



## GEOTEKNİK PARAMETRELERİN VE YÜKLEME ŞARTLARININ GÜNEŞ PANEL SİSTEMLERİNİN DEPLASMANLARI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

E. Büşra ÇIKILI<sup>1\*</sup>, M. Kubilay KELEŞOĞLU<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Geoproje Mühendislik Danışmanlık İnşaat San. ve Tic. Ltd. Şti., İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Güneş Panelleri, Temel Sistemleri, Deplasmanlar, FLAC 3D, Sayısal Model.</i>	Güneş enerjisi yenilenebilir olması ve çevre kirliliğine neden olmamasından dolayı son yıllarda ülkemizde kullanım yüzdesi giderek artan enerji kaynakları arasında yer almaktadır. Güneş panellerinin taşıyıcı sistemi ve çelik kolonlarla tesis edilen panel temellerin davranışı incelenmeye değer konulardır. Bu çalışmada güneş panel temellerinin zemin ile etkileşimi ve geoteknik tasarımını etkileyen faktörler irdelenmiştir. FLAC 3D üç boyutlu sonlu farklar yazılımıyla güneş paneli üst yapısı ve zemin profili modellenmiş, referans geoteknik parametreler kullanılarak 8 farklı yük kombinasyonu için analizler gerçekleştirilmiştir. Zemin parametrelerinin (elastisite modülü, kayma mukavemeti açısı) değiştiği, kazık soket boyu, kar ve rüzgâr yükü etkisinin incelendiği seri analizler yürütülmüştür. Bu analizler dahilinde panel sisteminin kazık elemanlarının deplasmanları incelenmiştir. Analiz sonuçlarından elde edilen bulgular kar ve rüzgâr yükünün sistemin deplasmanları bakımından belirleyici olduğu, ilaveten soket boyu ve zeminin mukavemet parametrelerinin de mobilize olan deplasmanları etkilediği sonucuna ulaşılmıştır.

## THE EFFECT OF GEOTECHNICAL PARAMETERS AND LOADING CONDITIONS ON DISPLACEMENT OF SOLAR PANEL SYSTEMS

Keywords	Abstract
<i>Solar Panels, Foundation Systems, Displacements, FLAC 3D, Numerical Modelling.</i>	Since the solar energy is renewable and does not cause environmental pollution, it is among the energy sources that have been used in our country in recent years. The structural system of solar panels and the behavior of panel foundations installed with steel columns are critical and requires further investigation. In this study, the interaction of the solar panel foundations with the soil and the factors affecting the geotechnical design were examined. The superstructure of the solar panel and the soil profile were modeled with FLAC 3D finite differences software and analyses were performed for eight different load combinations using the reference geotechnical case. Serial analyses were carried out in which soil parameters (elasticity modulus, angle of shearing resistance) were varied with the influence of pile socket length, snow and wind loads. Within these analyses, the displacements of the pile elements of the panel system were examined. The findings obtained from the numerical results show that the snow and wind loads are dominant in terms of the displacements of the system, in addition, the socket length and strength parameters of the soil also greatly influence the mobilized displacements.

### Alıntı / Cite

Çıkılı, E.B., Keleşoğlu, M.K. (2023). Güneş Paneli Sistemlerinde Gözlenen Deplasmanların Sonlu Farklar Yöntemi İle Tahmini, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 11(3), 985-1000.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

E.B. Çıkılı, 0000-0003-1373-7856  
M.K. Keleşoğlu, 0000-0003-1721-7946

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	30.11.2021
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	12.11.2022
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	26.12.2022
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	28.09.2023

\* İlgili yazar / Corresponding author: busracikili@hotmail.com.tr, +90-535-715-9256

# THE EFFECT OF GEOTECHNICAL PARAMETERS AND LOADING CONDITIONS ON DISPLACEMENT OF SOLAR PANEL SYSTEMS

E. Büşra ÇIKILI<sup>1†</sup>, M. Kubilay KELEŞOĞLU<sup>2</sup>

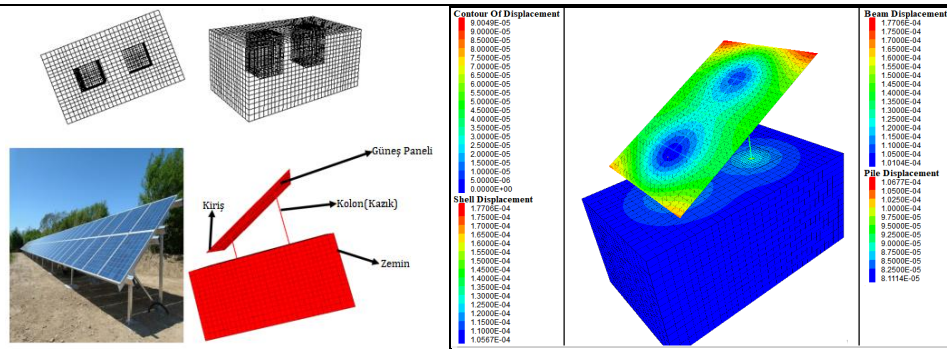
<sup>1</sup> Geoproje Mühendislik Danışmanlık İnşaat San. ve Tic. Ltd. Şti., İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

## Highlights

- The use of solar energy has gained importance in recent years.
- Today, the number of solar power plants with many applications continues to increase.
- With this increase, the need for information, from the development of solar panel elements to the issues to be considered in the assembly in the field, is also increasing.
- In this study, the solar panel system was modeled in FLAC 3D software. The displacement behavior of pile elements depending on various variables has been investigated.

## Graphical Abstract (If applicable)



**Figure.** The schematic view of a typical solar panel system and its numerical model counterpart

## Purpose and Scope

In the study, the interaction of the solar panel foundations with the ground and the factors affecting the geotechnical design were examined. Instead of empirical subgrade modulus values geotechnical parameters such as elasticity modulus, angle of shearing resistance of geomaterials were used.

## Design/methodology/approach

Analyses were performed for eight different load combinations using the reference geotechnical case. Serial analyses were carried out in which soil parameters (elasticity modulus, angle of shearing resistance) were varied with the influence of pile socket length, snow and wind loads.

## Findings

In our analysis, we examined pile element displacements in the panel system. Numerical results highlight the dominance of snow and wind loads in system displacements, with soil socket properties also strongly influencing these displacements.

## Research limitations/implications (if applicable)

The findings of this research needs verification with measured field data and perhaps further modifications or analyses must be carried out for a better understanding of the structural mechanism.

## Practical implications (if applicable)

Increased  $\pm y$ -direction wind loads caused rapid displacements in the panel system, resulting in collapse for certain load combinations. Solar panel systems, lacking side walls, need examination for the parachute effect, with wind and snow loads being critical factors. ASCE standards recommend higher wind speeds than TS 498 in Turkey, potentially leading to unsafe design outcomes based on TS 498 guidelines.

## Social Implications (if applicable)

The social impact of this paper is for the design engineers and solar panel companies. As the design methodologies are further improved the efficiency of such power plants will increase.

## Originality

In this study, we used FLAC3D software to model the entire solar panel system, including structural elements, soil profiles, and load combinations. The model allowed us to investigate pile element displacement under different conditions.

<sup>†</sup> Corresponding author: busracikili@hotmail.com.tr, +90-535-715-9256

## 1. Giriş (Introduction)

Güneş enerjisinin kullanımı ülkemizde son yıllarda önem kazanmaya başlamıştır. Türkiye, güneş ışınımı ve güneşlenme süreleri bakımından bu enerjinin kullanılabilirliği ülkelerden birisidir. Günümüzde mevcut birçok uygulaması bulunan güneş enerjisi tesislerinin sayıları artmaya devam etmektedir. Bu artışla birlikte güneş panel elemanlarının geliştirilmesinden sahada montajında dikkat edilmesi gereken hususlara kadar bilgi ihtiyacı da artmaktadır. Akdağ ve Yeroğlu (2019) tarafından güneş santralini, güç sistemine en iyi şekilde entegre etmek için sanal model oluşturulup, güç sistemine etkileri analiz edilmiştir. Güner ve Yazıcı (2022) tarafından dağıtım sistemlerinin çalıştığı süre boyunca görevlerini yerine getirmesini temsil eden güvenilirlik analizleri yapılmıştır. Güneş panellerinin uzun süre veriminin korunması önemli bir konu olarak karşımıza çıkmakta ve panel sisteminin yapısal tasarımında yapılan birtakım hatalar bu verimi azaltmaktadır (Girgin, 2011). Özellikle servis vermekte olan tesislerde, panel temellerinde ve çevresinde zaman içerisinde oluşan boşluklar ve çatlaklar ile bunlara bağlı gelişen oturmalar, panel verimliliğini ciddi olarak düşürmektedir. Bu çalışma kapsamında güneş paneli sistemini oluşturan elemanlar, zemin profili, yük ve yük kombinasyonları FLAC 3D yazılımında tanımlanarak güneş panel sistemini oluşturan yapısal elemanların tamamı modellenmiştir. Güneş panel sisteminin hem statik hem de geoteknik modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde çeşitli değişkenlere bağlı olarak kazık elemanların deplasman davranışları incelenmiştir. Modelin analizine geçmeden önce güneş panellerinin geoteknik tasarımı, güneş paneli üzerine etki eden yükler ve yük kombinasyonları anlatılmaktadır. Tek tabakadan oluşan zemin profilinin özellikleri, güneş paneli sistemini oluşturan elemanların özellikleri, yükleme şekli, kullanılan yük kombinasyonları aktarılmıştır. Panel sistemin çelik ayakları üzerindeki deplasman değerlerini etkileyen unsurları incelemek için farklı zemin parametreleri (elastisite modülü, kayma mukavemeti açısı), kazık elemanın soket boyu uzunluğu, rüzgâr yükü ve kar yükü için yapılan analizler sonucunda elde edilen deplasman değerleri sunulmuş ve her bir değişikliğin sonuçlar üzerindeki etkisi incelenmiştir.

## 2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Güneş insanlık için tükenmez bir enerji kaynağıdır. Güneş'in kütesinin büyük bir kısmı (%90) protonlardan oluşmaktadır. Güneş'in ışıması  $3.86 \times 10^{26}$  J/saniye olup, saniyede yaklaşık 600 milyon hidrojen(proton) tüketilir. (Girgin, 2011). Saniyede  $3.86 \times 10^{26}$  J ışıma değeri, hidrojen atomlarının nükleer faaliyeti sonucu Helyum atomu oluşmasına ve açığa çıkan enerjiyi ifade etmektedir(Varınca ve Gönüllü, 2006). Buna bağlı olarak Güneş'teki hidrojen yakıtının tükenmesi için gerekli süre yaklaşık 5 milyar yıldır (Girgin, 2011).

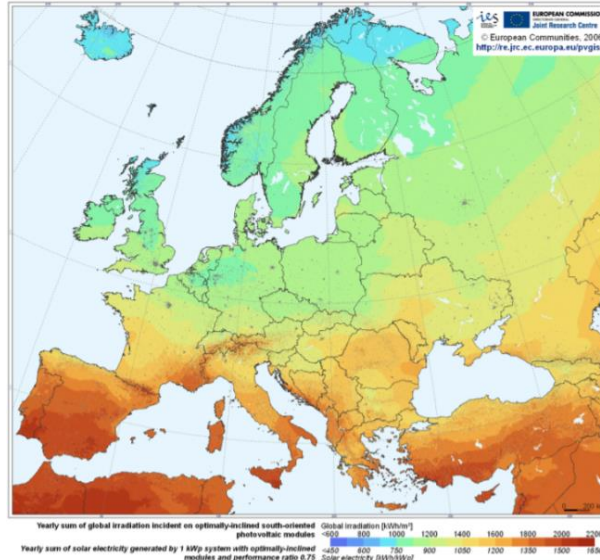
Işın olarak tüm doğrultularda yayılan bu enerji  $3 \times 10^8$  m/s ışık hızıyla hareket ettiği için, Dünya'ya 8 dakika 20 saniyede ulaşacaktır (McVeigh, 2013). Güneş ışınlarının bir kısmı atmosferden geçerek Dünya'ya ulaşırken bir kısmı da bulutlardan geri yansır. Bu yansımaya rağmen 84 dakikalık ısı radyasyonun Dünya'nın bir yıllık enerji ihtiyacını karşılayacağı tahmin edilmektedir (Kalogirou, 2013).

Tarihte kullanılan ilk enerji üretim kaynağı Güneş'tir. M.Ö. 287-212 yılları arasında Yunan filozof ve matematikçi Archimed güneş ışınlarını aynadan yansıtarak Roma gemilerini yakmıştır (Kalogirou, 2013).18. Yüzyılda demir gibi metallerin eritilmesine yarayan güneş enerjisini toplayan kolektörlerin olduğu bilinmektedir. 19.Yüzyılda ise August Mouchot güneş enerjisinin farklı enerjilere dönüştürülmesi prensibine dayanan parabolik aynalar ile çalışan buhar makinesini yapmıştır (Özbaşaran,2018).

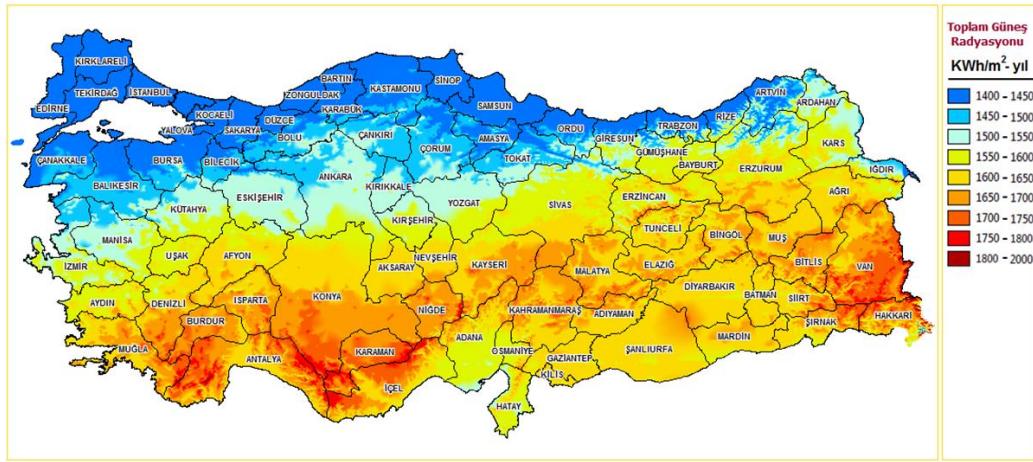
1839 yılında platin tabakalar ile yaptığı çalışmalar sonucunda güneş hücreleri ya da panelleri ile Güneş'ten elektrik elde etme yöntemi olan fotovoltaik etkiyi ilk Fransız fizikçi Alexander Edmond Becquerel, 1873 yılında bilim insanı Willoughby Smith selenyumun fotoiletken olduğunu keşfetmiştir. 1946 yılında Russell Ohl fotovoltaik güneş panelinin patentini almıştır (Çıkılı,2017).

ABD'nin New Mexico eyaletinin Albuquerque şehrinde 1979 yılında ilk ticari güneş santralleri kurulmuştur. 1985 yılında Barstow, California'da kurulan güneş paneli tarlasının Güneş olmadığı zamanlarda 7 MW'lık enerji ürettiği bilinmektedir (Kalogirou, 2013).

Şekil 1'de görüldüğü üzere Türkiye Avrupa'daki en güneşli bölgelerden birisidir. Türkiye'de güneş enerjisi sistemleri için en uygun yerler Devlet Meteoroloji İşleri(DMİ) Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan Şekil 2'deki ışınım haritasına göre Orta Anadolu, Akdeniz ve Güneydoğu Anadolu bölgeleridir. (Girgin, 2011).



Şekil 1. Avrupa Güneş Enerji Haritası (Europe Solar Energy Map)(Girgin, 2011)



Şekil 2. Türkiye Işınm Haritası (Turkey Radiation Map)(Girgin, 2011)

Güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren güneş pilleri, elektrik üretimi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Fotovoltaik (PV) güç sistemleri, akım ve voltaja bağlı fotovoltaik modüller, depolamaya yarayan aküler, kontrol alt sistemi ile doğru akım / alternatif akım (DC/AC) çeviricilerden oluşmaktadır. Çatı ve yüzeylerdeki sistemlerin güçleri 1-50 kW, fotovoltaik santrallerin güçleri ise 100 kW-MW arasında değişmektedir (Keçel, 2007).

Kurulu güç kapasitelerine göre Çin'de Tengger Desert Solar Park (1547 MW), Hindistan'da Kurnool Ultra Mega Solar Park (1000 MW), Amerika Birleşik Devletleri'nde Solar Star (I and II)(579MW) olmak üzere Dünya'da büyük kapasiteli güneş enerji santralleri bulunmaktadır (Özbaşaran,2018).Türkiye'de ise Konya'da Karapınar YEKA-1 (756 MW), Ankara'da Naturel ve Esenboğa Enerji(118 MW), Kayseri'de Kayseri OSB (50 MW) olmak üzere bir çok bölgede güneş enerji santralleri bulunmaktadır.

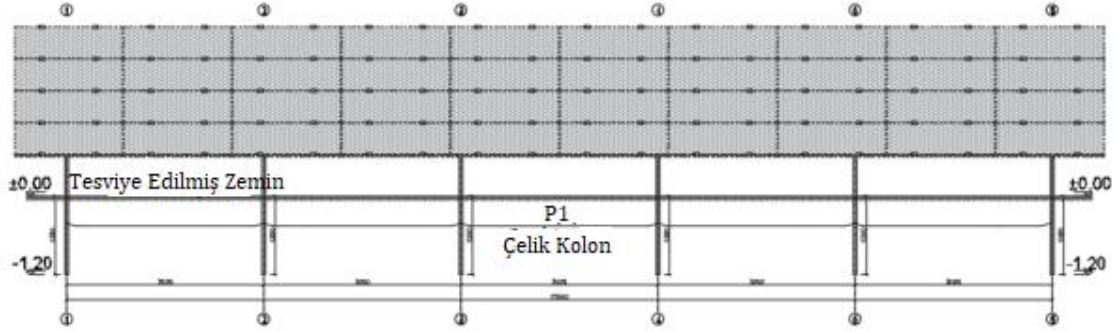
Güneş panelleri çatılara ve açık arazilere kurulmaktadır. Açık arazilere kurulan güneş panelleri alçak ve yüksek montaj olmak üzere iki şekilde inşa edilmektedir. Alçak montaj sistemlerinde paneller zemin yüzeyine yakinen, yüksek montaj sistemlerinde tarım ve hayvancılık gibi faaliyetlerin yapılmasına uygun olarak tasarlanmaktadır (Lutenegger, 2016).

Güneş paneli sistemlerinin temel tasarımında yerinde dökme beton kazık, prefabrik beton kazık, doldurulmuş temel, yerinde dökme pabuç tabanlı kazık, yerinde dökme beton kazık, zemin vidası tercih edilebilmektedir (Lutenegger, 2016). Güneş enerji santralleri ile ilgili elektrik ve mekanik yönden birçok çalışma yapılmış olup, bu çalışma kapsamında geoteknik tasarımı ile ilgili çalışmalar yapılmıştır.

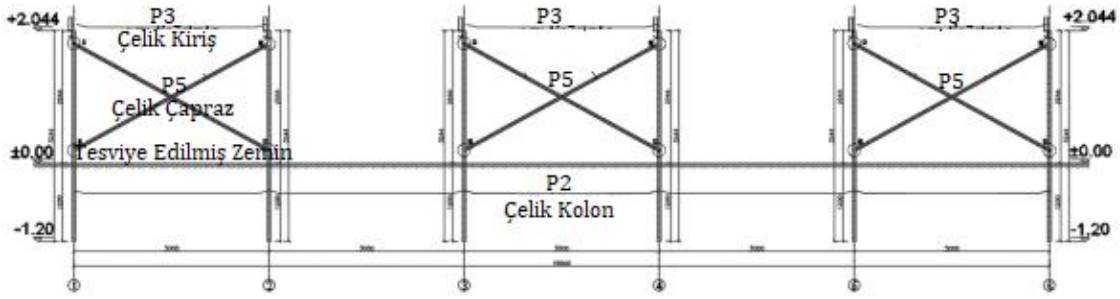
### 3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

#### 3.1. Güneş Panel Sisteminin Özellikleri (Properties of Solar Panel System)

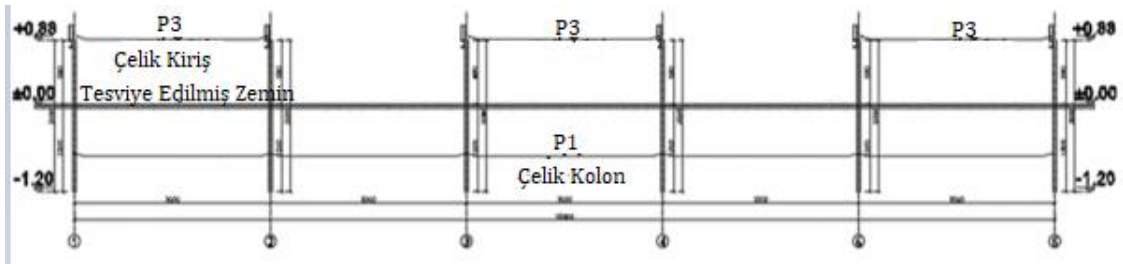
Bu çalışmada Ankara ili sınırları içinde kalan bir güneş enerji santrali için hazırlanmış tipik bir projenin detayları esas alınmıştır. Panel sistemi Şekil 3, Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da verilen kesit geometrisi ve boyutları aynı 12 adet kazık ve 6 adet kiriş eleman ile diğer yardımcı elemanlardan (aşıklar ve çapraz elemanlar) oluşmaktadır. Şekil 6'da görüldüğü üzere güneş paneli sisteminde kısa kazıkların uzunluğu 2.08 m iken uzun kazıkların boyu 3.24 m'dir. Kazık soket boyu ise 1.20 m olarak belirlenmiştir. Kazık, kiriş, aşıklar ve çapraz elemanlara ait profil kesitleri Şekil 7'de verilmiştir. Kazık, kiriş ve aşıklar elemanlar S235JR çeliği ile çapraz elemanlar ise soğuk döküm çelik (S235C) olarak tanımlanmıştır, Tablo 1'de malzeme özellikleri verilmiştir.



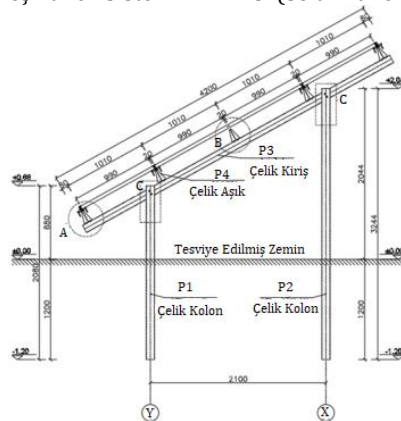
Şekil 3. Güneş Paneli Sistemi Ön Görünüşü (Solar Panel System Front View)



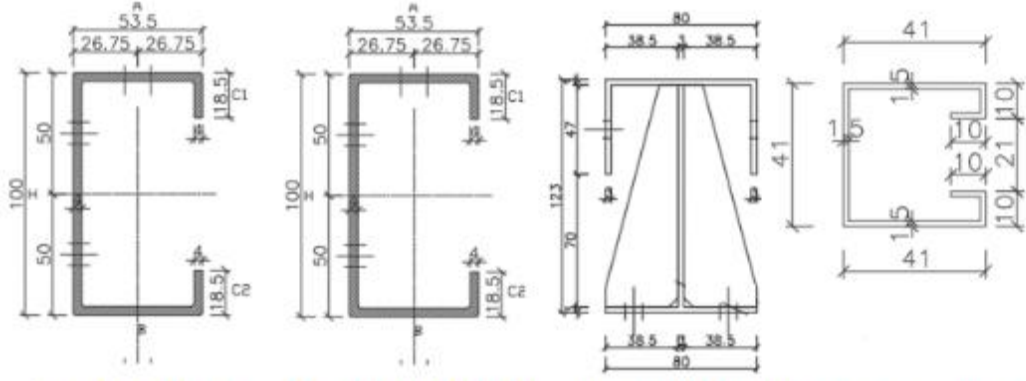
Şekil 4. Güneş Paneli Sistemi X-X Aksı (Solar Panel System X-X Axis)



Şekil 5. Güneş Paneli Sistemi Y-Y Aksı (Solar Panel System Y-Y Axis)



Şekil 6. Güneş Paneli Sistemi X-Y Aksı (Solar Panel System X-Y Axis)



(a)Kazık Eleman Detayı (b)Kiriş Eleman Detayı (c)Aşık Eleman Detayı (d)Çapraz Eleman Detayı

Şekil 7. Güneş Paneli Sistemi Yapısal Eleman Kesitleri (Solar Panel System Structural Element Sections)

Tablo 1. Çelik Elemanların Malzeme Özellikleri (Material Properties of Steel Elements)

Çelik Türü	$f_{yk}$ (MPa)	$E_p$ (MPa)
S235JR	235.36	210000
S235C	235.00	210000

### 3.2. Sisteme Etkiyen Yükler (Loads Acting on The System)

Güneş panellerine etkiyen farklı yükleme durumları söz konusudur. Rüzgâr ve kar yükleri TS 498'e göre hesaplanabilir. Panel üzerine etkiyen yükler panel yüzeyine düzgün yayılı yük olarak aktarılabilir ya da panelleri taşıyan aşık elemanlara çizgisel yük olarak uygulanabilir. Bu çalışmada yükler aşıklara çizgisel yük olarak uygulanmıştır. Güneş panellerinin sahip olduğu mevcut ısı nedeniyle üzerinde buz tabakasının oluşmayacağı varsayılmış, ayrıca sisteme etkimesi muhtemel deprem yükleri ihmal edilmiştir (Keçel, 2007). Panel yükleri hesaba katılırken güneş panellerinin boyutları dikkate alınmıştır. Bu çalışmada kullanılan paneller 1640×990 mm'dir ve ağırlığı ise 18.30 kg/adet'tir. Tablo 2'de sisteme etkiyen panel yükleri verilmiştir.

Tablo 2. Panel Yükleri (Panel Loads)

Panel Yüğü (kg/adet)	Panel Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> )	Panel Yüğü (kN/m <sup>2</sup> )	İç / Dış Kirişlere Aktarılan Panel Yüğü (kN/m)
18.30	1.623	0.112	0.055 / 0.109

Kar yükleri hesaba katılırken tesisin bulunduğu coğrafi bölge önem kazanmaktadır. Tesis Konya ili sınırları içindedir ve bölgenin rakımı yaklaşık olarak 1200 m'dir. TS 498/EK-I il ve ilçelere göre zati kar yükü bölgeleri çizelgesi ve TS 498/EK-II'de verilen kar yağış yüksekliği haritasına göre söz konusu mevkii II. Bölge sınırları içinde yer almaktadır. Tablo 3'de 30°'lik çatı eğimi için kar yükü ( $P_k$ ) değerleri verilmiştir.

Tablo 3. Kar Yükleri (Snow Loads)

$P_{k0}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$P_k$ (kN/m <sup>2</sup> )	İç Kirişlere Aktarılan Kar Yüğü (kN/m)	Dış Kirişlere Aktarılan Kar Yüğü (kN/m)
1.155	1.155	1.143	0.571

Rüzgâr yükleri hesaba katılırken panel sisteminin zemin yüzeyinden yüksekliği dikkate alınır. Panel sisteminin yüksekliği 0-8 m arasındadır.

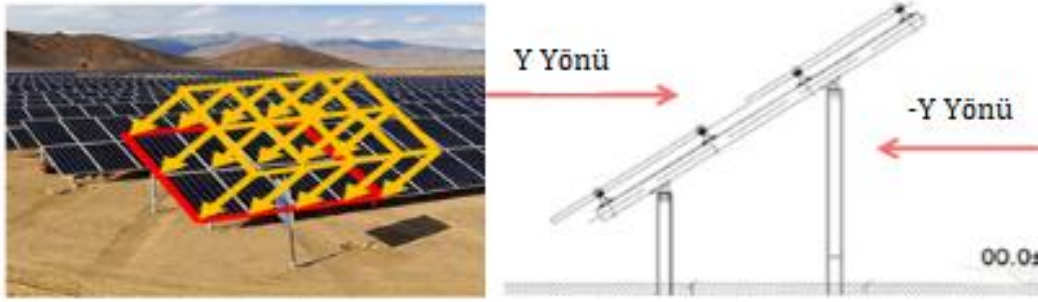
TS 498'den faydalanılarak panellere etkiyecek emme yükü ( $q$ ) Tablo 4'ten 0.5 kN/m<sup>2</sup> olarak alınmış ve yapıya etkiyen rüzgâr yükleri Tablo 5'teki gibi hesaplanmıştır. Rüzgâr yükleri aşık elemanlara, normal eksenleri doğrultusunda Şekil 8'deki gibi basınç ve çekme olarak uygulanmıştır.

**Tablo 4.** Rüzgâr Yükünün Hesaplanması (Calculation of Wind Load) (TS 498,1997)

Zeminden Yükseklik (m)	Rüzgâr Hızı, v (m/s)	Emme, q (kN/m <sup>2</sup> )
0-8	28	0.5
9-20	36	0.8
21-20	42	1.1
>100	46	1.3

**Tablo 5.** Rüzgâr Yükleri (Wind Loads)

Rüzgâr Yükü (kN/m)	+Y	-Y
İç kirişlere aktarılan	0.089	0.198
Dış kirişlere aktarılan	0.045	0.099

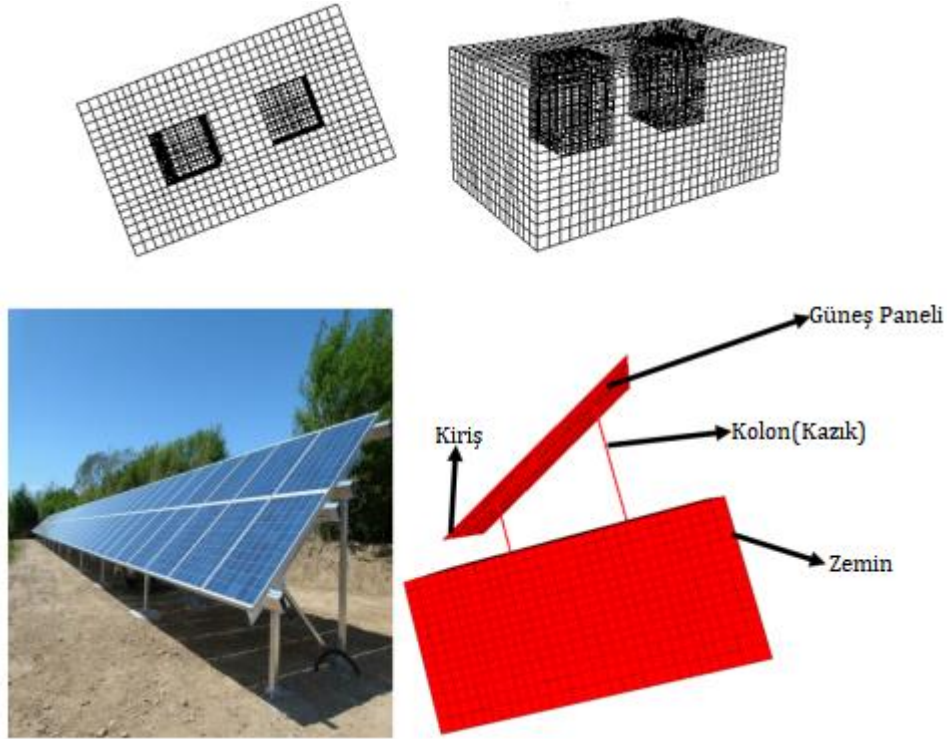
**Şekil 8.** Panele Etkiyen Rüzgâr Yükleri (Wind Loads Acting On The Panel)

### 3.3. Sayısal Modelin Oluşturulması (Constitution of the Numerical Model)

FLAC 3D yazılımı ile oluşturulan sayısal modelin oluşturulma aşamaları;

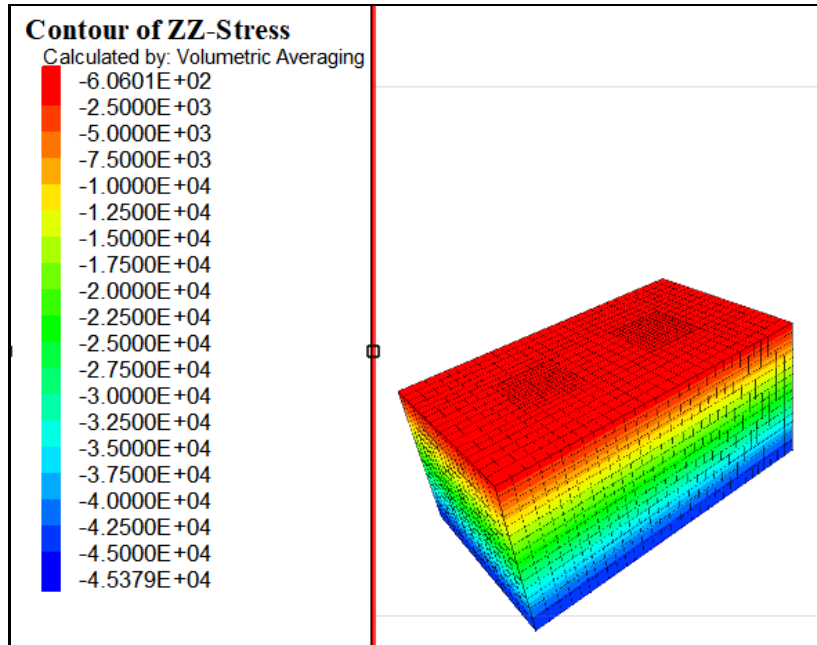
- Sonlu farklar ağının oluşturulması,
- Sınır koşullarının tanımlanması,
- Zemin ve yapısal elemanların özelliklerinin tanımlanması,
- Panel ayağı ile zemin ara yüzey özelliklerinin tanımlanması,
- Başlangıç gerilme durumunun tanımlanması,
- Yükleme durumlarının tanımlanması olarak sıralanabilir.

Şekil 6'da tanımlanan eksen takımına göre sayısal modelde zemin tabakasının kalınlığı x eksenine doğrultusunda 2.50 m olarak alınmıştır. Y ekseninin genişliği 3.00 m ve Z eksenine ise 5.00 m genişliğindedir. Zemine gömülü ayakların boyları değişkendir ancak referans analizde 1.20 m olarak alınmıştır. Zemin bünye modeli elastik-tam plastik Mohr-Coulomb olarak tanımlanmış olup, zemin modelinde yeraltı suyu bulunmamaktadır. Çelik profil elemanlar elastik kiriş (beam) olarak tanımlanmıştır. Güneş panelleri kabuk (shell) eleman olarak tanımlanmıştır. Model öncelikle zati ağırlığında yüklenerek başlangıç gerilme durumu oluşturulduktan sonra yapısal elemanlar aktif edilmiş ve sonrasında aşamalı olarak rüzgâr ve kar yükü sistem üzerinde aktif edilmiştir. Kazık ve zemin arasındaki etkileşim normal ve kayma doğrultusundaki yaylarla tanımlanmış ve ara yüzeyde rijit bağlantı olduğu kabul edilmiştir. Yapılan seri analizler bu kabulün mukavemet parametrelerinin %50'sine kadar düşürülmesi durumunda da geçerli olduğunu ve deplasman sonuçları üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Tüm bu aşamalar neticesinde elde edilen ve bu çalışma kapsamında analiz edilen model Şekil 9'da verilmektedir. Panel sisteminin temellerini oluşturan kazıklar etrafındaki elemanlar sıklaştırılmıştır.



Şekil 9. Sayısal Modelin Üç Boyutlu Görüntüsü (Three Dimensional View of the Numerical Model)

Zemin ortamında gerilme koşulları, düşey gerilme  $\sigma_v$  ve zeminin sükûnetteki toprak basıncı katsayısı  $K_0$  ile hesaplanan yatay gerilme değeri  $\sigma_h$  ile tanımlanmaktadır. FLAC 3D programında ise birim hacim ağırlık ve yer çekimi ivmesine bağlı olarak z doğrultusundaki başlangıç gerilme durumu hesaplanmıştır. Başlangıç düşey efektif gerilme dağılımı Şekil 10'da verilmiştir.

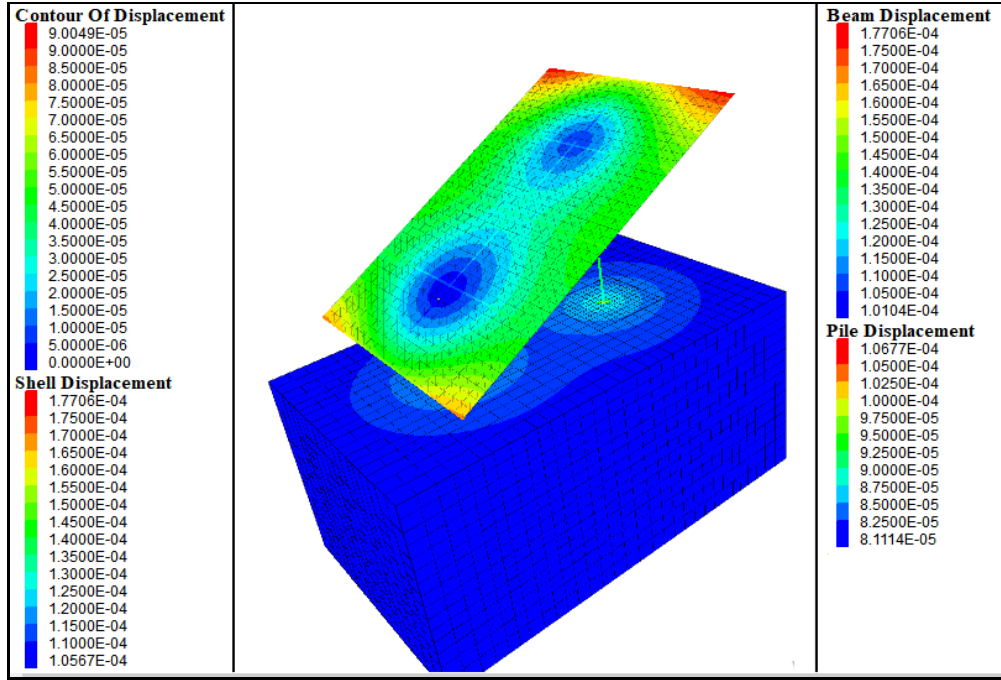


Şekil 10. Başlangıç Düşey Efektif Gerilme Dağılımı Üç Boyutlu Görüntüsü (Three Dimensional View of Initial Vertical Effective Stress Distribution)

Zemin tabakaları ve yapısal elemanları tanımlamak için elasto-plastik Mohr-Coulomb bünye modeli seçilmiştir. Mohr-Coulomb gibi izotropik malzeme modelleri, zemin davranışını tanımlamak bakımından birçok uygulamada başarıyla kullanılmaktadır. Buna ilaveten yapısal elemanlarla etkileşim halindeki zemin modellerinde Mohr-Coulomb bünye modeli sıklıkla kullanılmaktadır (Gürgüç, 2013).



Yapısal elemanların geometrisini tanımlamak için öncelikle vektör elemanlar oluşturulur ve bu elemanlara bağlı olarak kazık, kiriş ve güneş paneli geometrisi bir vektör elemandan başlatılıp diğer vektör elemanla sonlandırılarak tamamlanır. Analizde öncelikle zati yükler altında denge koşulu aranır, dengeye ulaşıldıktan sonra deplasmanlar sıfırlanır (Itasca, 2002). Denge koşulunun sağlanması Şekil 11’de verilmiştir. Panel sistemine etkiyen yükler ise Şekil 12’de verilmektedir; X ve Y doğrultularında rüzgâr yükleri ile Z doğrultusundaki kar yükü uygulanmıştır.



Şekil 11. Denge Durumunun Sağlanması (Providing A State of Balance)

Arazide gerçekte inşa edilecek güneş paneli projesi ile yapılacak olan analizlerin değerlendirmelerini yapabilmek için söz konusu projenin hesap raporlarına bağlı kalınmıştır. Çelik yapıların hesap ve yapım kurallarının yer aldığı TS 648’de tanımlanan yük kombinasyonları kullanılarak seri sayısal analizler yürütülmüştür. Yük kombinasyonları D: zati yük, S: kar yükü ve W: rüzgâr yükü olacak şekilde tanımlanmaktadır.

- D, D+S, D+S+0.5W, D+S-0.5W, D+0.5S+W, D+0.5S-W, D+W, D-W



(a)



(b)



(c)

**Şekil 12.** (a) X Doğrultusundaki Rüzgâr Yüğü (Wind Load In The X Direction), ( b) Y Doğrultusundaki Rüzgâr Yüğü (Wind Load In The Y Direction) , (c) Yer Çekimi Doğrultusundaki Kar Yüğü (Snow Load In The Gravity Direction)

#### 4. Sayısal Model Sonuçları (Numerical Model Results)

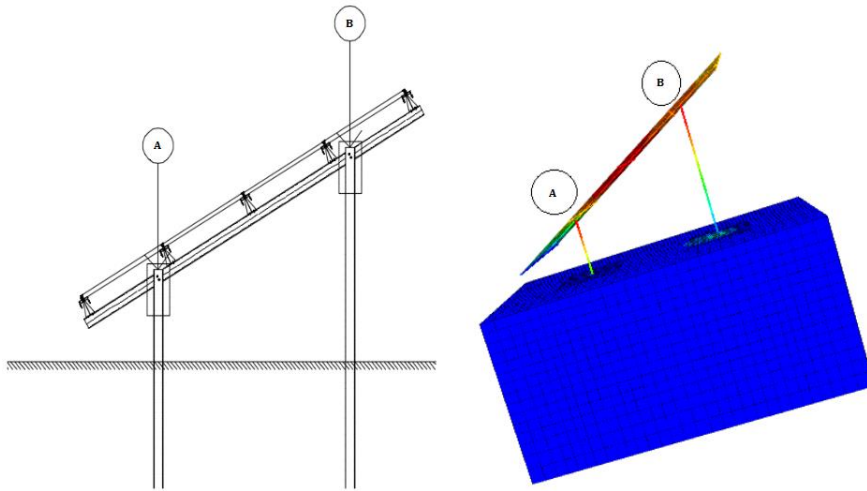
##### 4.1. Referans Analizler (Reference Analyses)

Analizlerde elastisite modülü, kayma mukavemeti açısı, kar yükü, rüzgâr yükü değerlerinin ve soket boyunun güneş panelinin kazık elemanlarında oluşacak deplasman büyüklüğüne etkisini belirlemek ve daha sonra yapılan parametrik değişimlerin sonuçlarını tek bir analizle kıyaslayabilmek amacıyla referans model oluşturulmuştur. Bu modelde kullanılan yapısal ve geoteknik parametreler referans parametreler olarak tanımlanmış ve Tablo 6'da

verilmiştir. Güneş panellerini taşıyan çelik kazık elemanda oluşan deplasman Şekil 13'te verilen A ve B noktaları için takip edilmiştir.

**Tablo 6.** Referans Analiz Parametreleri (Reference Analysis Parameters)

Elastisite Modülü (Pa)	4.10 <sup>7</sup>
Poisson Oranı	0.30
Birim Hacim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	2.10 <sup>3</sup>
Kayma Mukavemeti Açısı (°)	30.00
Kohezyon (Pa)	0.00
Kar Yüğü (Pa)	115.00
(+) Rüzgâr Yüğü (Pa)	100.00
(-) Rüzgâr Yüğü (Pa)	200.00
Normal Ve Kayma Doğrultusundaki Yayın Birim Uzunluk Rijitliği (N/m <sup>2</sup> )	1,3.10 <sup>9</sup>
Normal Ve Kayma Doğrultusundaki Yayın Kayma Mukavemeti Açısı (°)	30.00

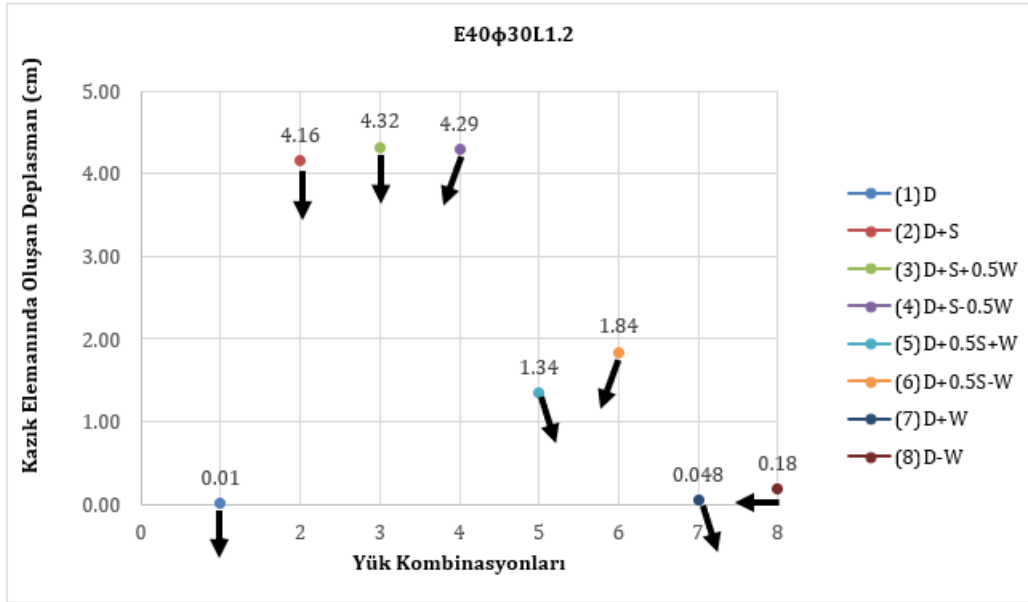


**Şekil 13.** Kazık Elemanı Deplasmanlarının Hesaplandığı A Ve B Noktaları (Points A And B Which Pile Element Displacements Are Calculated)

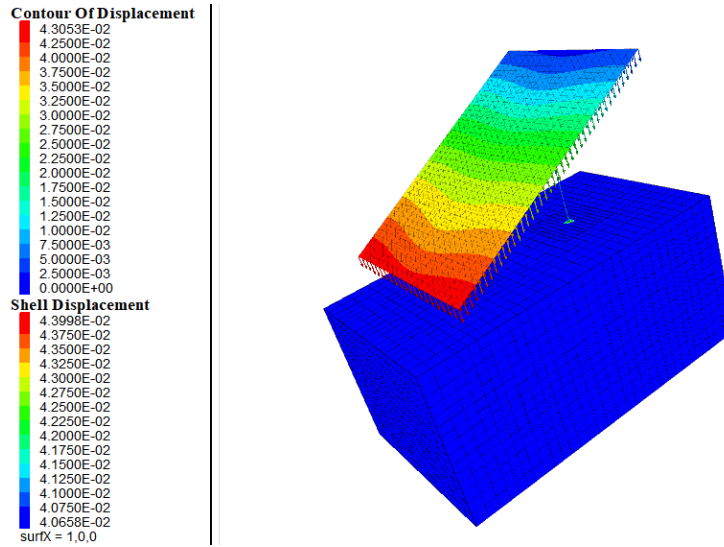
Kar yükünün etkili olduğu D+S (4.16cm), D+S+0.5W (4.32cm), D+S-0.5W (4.29cm) yükleme kombinasyonlarında panelleri taşıyan kazık elemanında oluşan deplasman değerleri diğer yük kombinasyonlarına göre nispeten daha fazladır. Şekil 14'te deplasman değerlerinin yanındaki okların yönü, toplam deplasmanların vektörel olarak doğrultusunu göstermektedir. Şekil 14'teki analizlerde kar yükü (1S) 115 Pa olup, basınç yönünde rüzgâr yükü (0.5W) 100 kPa, çekme yönünde rüzgâr yükü (-0.5W) 200 kPa olarak etki ettirilmiştir.

Basınç yönünde rüzgâr yükünün bulunduğu D+W yükleme kombinasyonunda deplasman diğer kombinasyonlara göre daha az (0.048 cm) hesaplanmıştır.

Aşağı yönde mobilize olan deplasmanlar kazık elemanın zemin içerisine doğru battığını ifade etmiş olup deplasmanın büyüklüğüne bağlı olarak farklı oturmalara neden olacaktır (Davisson, 1960). Yatay yönlü olan deplasmanlar ise deplasmanın büyüklüğüne bağlı olarak kazık elemanın zeminden sıyrılmasına neden olup çelik ayakların etrafında zamanla boşluk oluşumuna neden olacaktır (Duncan vd., 1994). Şekil 15'te 1D1S0.5W (4.32cm) yükleme kombinasyonundaki deplasman görüntüsü verilmiştir.



Şekil 14. Referans Parametrelerle Yapılan Analizlerden Elde Edilen Deplasman Değerleri (Displacement Values Obtained From Analysis With Reference Parameters)



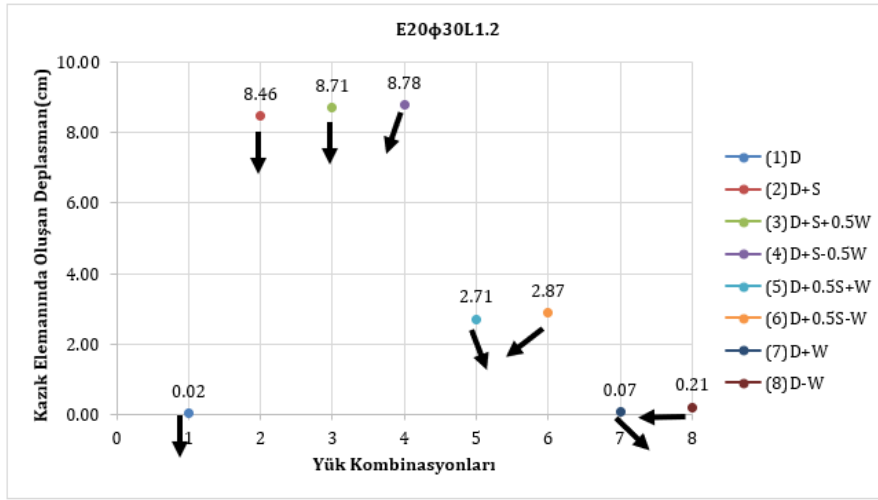
Şekil 15. (3) 1D1S0.5W Yük Kombinasyonunda Güneş Panelinde Oluşan Deplasmanlar (Displacements of Solar Panel In (3)1D1S0.5W Load Combination)

#### 4.2. Elastisite Modülünün Etkisi (Effect of Modulus of Elasticity)

Elastisite modülünün kazık elemanında oluşan deplasmana etkisini anlamak için elastisite modülü değerinin  $2 \cdot 10^7 \text{ Pa} = 20 \text{ MPa}$  olduğu analizler yapılmıştır. Referans analizlerle ( $E = 4 \cdot 10^7 \text{ Pa} = 40 \text{ MPa}$ ) karşılaştırıldığında deplasmanlar Şekil 16'da görüldüğü üzere modül değerindeki azalışla ters orantılı şekilde iki kat doğrusal artış göstermiştir. D+W, D-W kombinasyonlarında elastisite modülü değişimine bağlı olarak deplasmanlar birbirine yakın değerlere sahiptir.

Bunun sebebi bahsi geçen yüklemelerde kar yükünün sıfır olmasına bağlı olarak rüzgâr yükü nedeniyle sağa ve sola eğilen panel sisteminde oturma gözlenmemesidir. Elastisite modülünün sonuçlar üzerinde son derece etkili olduğu anlaşılmaktadır.

Özellikle, güneş panel sistemlerinde soket boylarının 1-2 m civarında olduğu düşünüldüğünde, zemin yüzeyine bu kadar yakın konumlanan çelik kazıklar için klasik zemin etütleri ile elastisite modülü tahmin etmenin ne kadar zor olduğu da düşünüldüğünde tanımlanan modül değerinin güvenli tarafta sonuçlar verecek şekilde yüksek seçilmesinin tasarım bakımından riskli olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

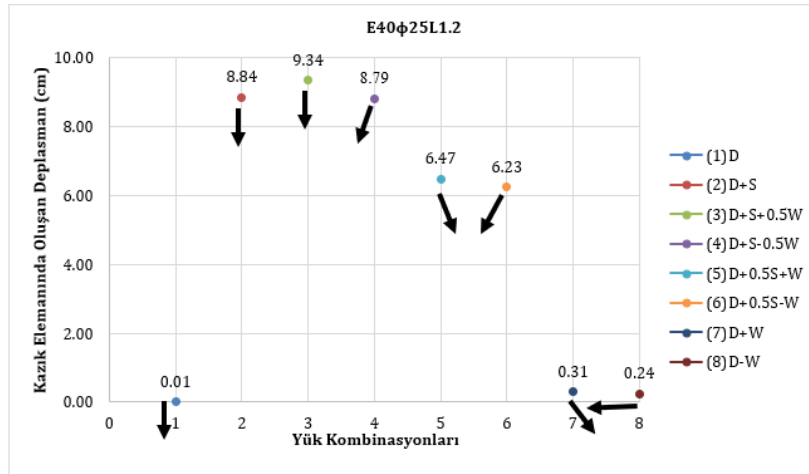


Şekil 16. Elastisite Modülü Değerinin  $2.10^7$  Pa Olduğu Analizler (Analysis With A Modulus of Elasticity  $2.10^7$  Pa)

#### 4.3. Kayma Mukavemeti Açısının Etkisi (Effect of Angle of Shearing Resistance)

Zeminin kayma mukavemeti açısı değerinin kazık elemanında oluşan deplasmana etkisini belirlemek için  $\phi = 25^\circ$  için analizler yapılmıştır. Kayma mukavemeti açısının  $\phi = 30^\circ$  olduğu referans analizlerle karşılaştırıldığında Şekil 17'de görüldüğü üzere deplasman değerleri beklenildiği gibi artmaktadır. Kayma mukavemeti açısının  $5^\circ$  azalması durumunda;

- Kar yükünün etkili olduğu D+S, D+S+0.5W, D+S-0.5W yük kombinasyonlarında kazık elemanında oluşan deplasmanlar 2 kata kadar artışa neden olurken,
- Rüzgâr yükünün etkili olduğu D+0.5S+W, D+0.5S-W, D+W, D-W yük kombinasyonlarında 3-6 kata kadar artışa neden olmaktadır.
- Rüzgar yükünün etkin olduğu yükleme durumlarında özellikle soket kazıklardaki çekme ve basınç etkisiyle deplasmanlarda önemli seviyelerde artış olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Boyları birkaç metreye ancak ulaşan çelik profil soket kazıkların etrafındaki zeminin kayma mukavemeti parametrelerinin panel sisteminde gözlenen deplasmanların seviyesini ne kadar değiştirebildiği aşikardır.

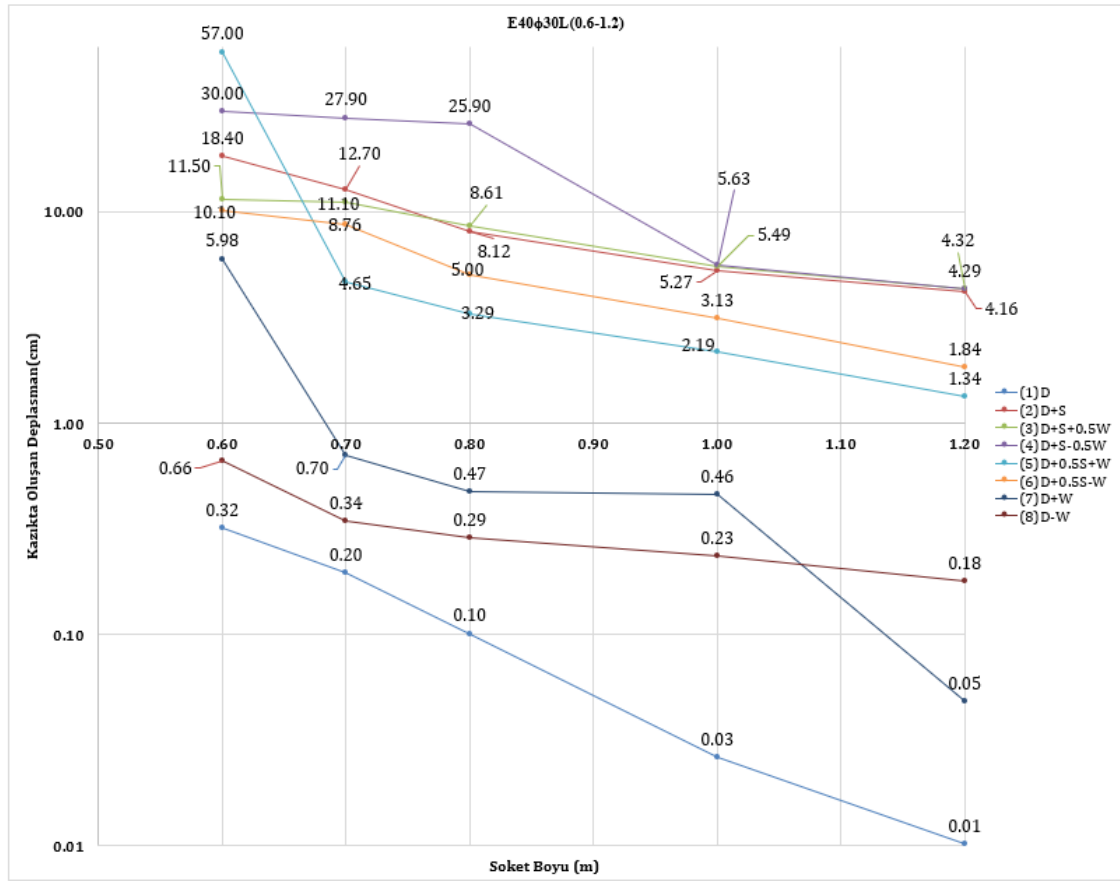


Şekil 17. Kayma Mukavemeti Açısının  $25^\circ$  Olduğu Analizler (Analysis Where Shear Strength Angle Is  $25^\circ$ )

#### 4.4. Soket Boyu Değişimi (Socket Length Effect)

Zemin ve zemin-kazık ara yüzey parametrelerini değiştirmeden kazık soket boyunun kazık elemanında etkisini anlamak için soket boyunun 0.60 m, 0.70 m, 0.80 m, 1.00 m, 1.20 m olduğu analizler yapılmıştır. Kazığın soket boyu arttıkça kazığın zemine gömülü bölümünde sürtünme direnci artacak ve buna bağlı olarak kazık üzerine gelen yükler kazığın soketi boyunca karşılandığı için kazıklar üzerindeki deplasmanlar daha az olacaktır. Şekil 18'de görüldüğü üzere soket boyunun azalması ile birlikte aynı yük kombinasyonu için güneş paneli ayaklarında hesaplanan deplasman değerleri de artmaktadır. Örneğin 4 no.lu yük kombinasyonunda 100 cm soket için

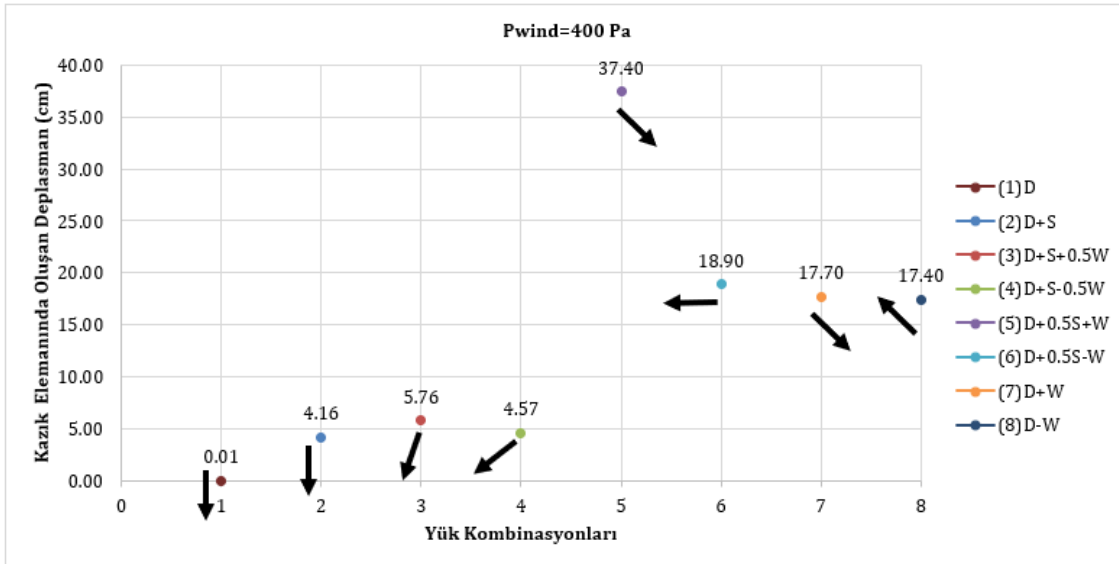
hesaplanan deplasman değeri 5.63 cm iken socketin 60 cm'ye düşmesi durumunda 30 cm deplasman hesaplanmıştır ki bu durum göçmenin gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 18. Soket Boyu-Deplasman Grafiği (Socket Length - Displacement Graph)

#### 4.5. Rüzgâr Yükü Etkisi (Wind Load Effect)

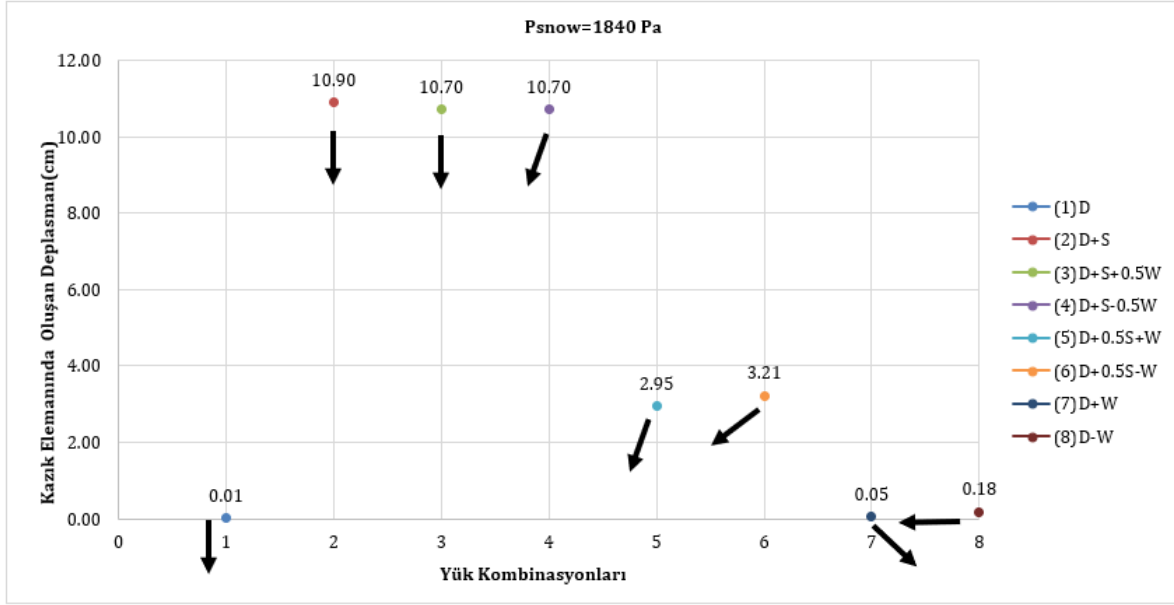
TS 498 esaslarına uyularak Konya ili referans alınarak yapılan hesaplarda rüzgâr yükü y yönünde 100 Pa, -y yönünde 200 Pa elde edilmiştir. Daha yüksek rüzgâr yüklerindeki etkiyi anlayabilmek için ise y yönünde 400 Pa, -y yönünde 400 Pa olan ilave analizler de yapılmıştır. Referans durumdaki analizler (+y yönünde 100 Pa, -y yönünde 200 Pa) ile karşılaştırıldığında ±y yönünde 400 Pa yükleme durumunda Şekil 19'da D+W ve D-W kombinasyonlarında panel sisteminde deplasmanlar hızla artmış ve sistem göçmüştür.



Şekil 19. Rüzgâr Yükünün 400 Pa Olduğu Analizler (Analysis Where Wind Load Is 400 Pa)

#### 4.6. Kar Yüğü Etkisi (Snow Load Effect)

Kar yükünün etkisini anlamak için en olumsuz koşulu temsil eden IV numaralı bölgeye denk gelen Erzurum şehri için kar yükü 1840 Pa olarak hesaplanmış ve sayısal model üzerinde analizler yapılmıştır. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar Konya şehri için yapılan referans analizler ile karşılaştırılmıştır. Kar yükünün etkili olduğu D+S, D+S+0.5W, D+S-0.5W kombinasyonlar için referans analizlerde (115 Pa) kazık elemanında oluşan düşey deplasmanlar sırasıyla 4.16 cm, 4.32 cm, 4.29 cm iken 1840 Pa kar yükünün etkili olduğu analizlerde Şekil 20'de görüldüğü üzere 2.5 kat artmıştır.



Şekil 20. Kar Yüğü'nün 1840 Pa Olduğu Analizler (Analysis of Snow Load of 1840 Pa)

#### 5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışma kapsamında, güneş paneli sistemini oluşturan tüm yapısal elemanlar, zemin profili, yük ve yük kombinasyonları FLAC3D yazılımında tanımlanarak, güneş paneli sistemi modellenmiştir. Güneş paneli sisteminin hem yapısal hem de geoteknik özellikleri tanımlanarak etkileşimli tam bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde çeşitli değişkenlere bağlı olarak kazık elemanların deplasman davranışları incelenmiştir. Deplasmanların artması zamanla panel yüzeylerinde kılcal çatlakların oluşmasını ve panel veriminin düşmesini tetiklemektedir.

- Elastisite modülü ve kayma mukavemeti açısının etkisinin irdelendiği analizlerde beklenildiği gibi her iki parametredeki azalmalar deplasmanları artırmaktadır. Ancak özellikle kar ve rüzgâr yükleri altında bu artışların çok daha ciddi seviyede olduğu anlaşılmaktadır. Referans analizlerdeki ( $E=4.10^7\text{Pa}=40\text{MPa}$ ) tüm kombinasyonlarda deplasmanlar 0.01- 4.32 cm iken elastisite modülünün  $2.10^7\text{Pa}=20\text{MPa}$  olduğu analizlerdeki tüm kombinasyonlarda deplasmanlar 0.02-8.78 cm olup, ters orantılı olarak iki kat doğrusal artış göstermektedir. Referans analizlerde ( $\phi=30^\circ$ ) rüzgâr yükünün etkili olduğu D+0.5S+W, D+0.5S-W, D+W, D-W yük kombinasyonlarında deplasmanlar 0.05-1.84 cm iken kayma mukavemeti açısının  $25^\circ$  olduğu yük kombinasyonlarında 0.24-6.47 cm olup 3-6 kata kadar artışa neden olmaktadır. Güneş paneli sistemlerinin çelik kazıklar üzerinde tesis edildiği temel sistemlerinde birkaç metre boyundaki soketlerin etrafındaki zeminler için modül ve mukavemet parametrelerinin belirlenmesi gerekir. Bu tip tesisler için yapılacak zemin etütlerinde daha sığ derinlikler için daha detaylı bir inceleme yapılması gerekmektedir.
- Soket boyu etkisinin irdelendiği analizlerde kazığın soket boyu arttıkça zemine gömülü bölümünde sürtünme kuvveti artmaktadır. Buna bağlı olarak kazık üzerine gelen yükler kazığın soketi boyunca karşılandığından kazığın soket boyu arttıkça deplasmanlar daha düşük gözlenmiştir.
- Rüzgâr yükü değişikliğine bağlı olarak yapılan analizlerde  $\pm y$  yönündeki rüzgâr etkisi arttıkça rüzgâr yükünün etkin olduğu kombinasyonlarda (D+W ve D-W) panel sisteminde deplasmanlar hızla artmış ve sistem göçmüştür. Güneş paneli sistemleri etrafı açık bir yapıya sahip olduğu için bu sistemlerde paraşüt etkisi mutlaka incelenmelidir. Bu konuda yeni çalışmalar güneş panelleri için en kritik yükleme durumunun rüzgâr ve kar yükleri olduğunu göstermektedir.

- Amerika Birleşik Devletleri'nin Colorado eyaletinde yapılan güneş panellerinde ASCE/SEI 7-10 (IBC 2012)'e göre rüzgâr hızı 51.75 m/s, basınç yönündeki rüzgâr yükü 289Pa, çekme yönündeki rüzgâr yükü 2681 Pa olarak hesaplanmıştır. TS 498'de güneş paneli yüksekliğine bağlı olarak 0.00-8.00 m yapılar için 28 m/s olarak alınmaktadır. Buna bağlı olarak basınç yönündeki rüzgâr yükü 100Pa, çekme yönündeki rüzgâr yükü 200 Pa olarak hesaplanmaktadır. ASCE tarafından alınması önerilen rüzgâr hızı değerleri TS 498 ile hesaplan değerlere göre daha fazladır. TS 498' de rüzgâr hızı sadece yapı yüksekliğine bağlı olarak tanımlanmaktadır. Rüzgâr hızının bölgesel olarak yapılan ölçümlere göre belirlenmesi daha sağlıklı olacaktır. Ülkemizde güneş paneli sistemi tasarımında kullanılan yükler TS 498 tarafından önerilen değerler alınarak yapılmakta ve bu nedenle güvensiz tarafta kalan sonuçlar elde edilmektedir.
- Kar yükündeki değişikliğe bağlı olarak yapılan analizlerde, kar yükünün artırılması sonucu deplasmanlar beklenildiği gibi artmaktadır. Deplasmanlar kar yükü etkisinden dolayı sistemde oturmaya sebep olacaktır. Oturmalar ihmal edilebilir değerlerin üzerinde ise çevre sürtünmesinin ve uç direncinin taşıdığı yükler ayrı değerlendirilmelidir. Kazıkta meydana gelen oturma değeri, kazık gövdesinin elastik sıkışması, gövde etrafındaki zeminin elasto-plastik deformasyonu ile kazık altındaki zeminin sıkışmasının etkileşimi ile hesaplanmalıdır.

### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

### Kaynaklar (References)

- Akdağ O. ve Yeroğlu C., 2019, Malatya Yöresi İçin Örnek Bir Güneş Santrali Modelinin Benzetimi Ve Şebekeye Etkilerinin İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarımı Dergisi, 7(3),552-560.
- Çıkılı, E.B., 2017, Güneş Panellerinin Temel Tasarımında Mevcut Yöntemlerin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Minimum Design Loads For Buildings And Other Structures, American Society Of Civil Engineers, [ASCE/SEI 7-10],2010.
- International Building Code 2012. Country Club Hills, Ill.: International Code Council, Inc., [IBC 2012],2011
- Davisson, M. T., 1960, Behavior of Flexible Vertical Piles Subjected to Moment, Shear, and Axial Load, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Duncan, J., Evans, L. ve Ooi, P. 1994, Lateral Load Analysis of Single Piles and Drilled Shafts. Journal of Geotechnical Engineering, 120(6), Sf. 1018-1033.
- Girgin, M.H., 2011, Bir Fotovoltaik Güneş Enerji Santralinin Fizibilitesi, Karaman Bölgesinde 5 MW'lık Güneş Enerjisi Santrali İçin Enerji Üretim Değerlendirmesi Ve Ekonomik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Enerji Enstitüsü.
- Güner S. ve Yazıcı S., 2022, Bir Güneş Enerji Sisteminin Dağıtım Sistemi Güvenilirliğine Etkilerinin İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi,10(2),538-549.
- Gürgüç, S.B., 2013, İki Doğrultuda Yatay Yüklü Kazık Grupları İle İlgili Bir İnceleme, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Itasca, 2002, Flac3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions User's Guide.
- Kalogirou, S.A., 2013, Solar energy engineering: processes and systems, Academic P.ed.
- Keçel, S., 2007, Türkiye'nin Değişik Bölgelerinde Evsel Elektrik İhtiyacının Güneş Panelleriyle Karşılmasına Yönelik Model Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Lutenegger, A.J., 2016, Foundation Alternatives for Ground Mount Solar Panel Installations, Geotechnical and Structural Engineering Congress 2016 1873–1885.
- Özbaşaran, B.,2018, Güneş Panellerinde Kullanılan Helisel Kazıkların Tasarımında Sayısal Yaklaşımların Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- TS 498, 1997, Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri.
- TS 648, 1980, Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları.
- Varınca, K.B., Gönüllü, M.T., 2006, Türkiye'de Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Bu Potansiyelin Kullanım Derecesi, Yöntemi ve Yaygınlığı Üzerine Bir Araştırma, I. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi 270–275.